Zur Kenntnis des lichtelektrischen Primärstromes in Kristallen

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde einer Hohen Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Georg August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Werner Flechsig

aus Hannover

Göttingen 1925

Referent: Professor Dr. R. Pohl.

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Juni 1925.

Die vorliegende Arbeit ist in der „Zeitschrift für Physik“, Band 33, Heft 5/6, erschienen.

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548122_0022

Zur Kenntnis des lichtelektrischen Primärstromes in Kristallen[1]).

Von **W. Flechsig** in Göttingen.

Mit 13 Abbildungen. (Eingegangen am 9. Juni 1925.)

Die Arbeit enthält Messungen über die Zeitdauer lichtelektrischer Primärströme in Kristallen. Untersucht werden Diamant, klare Zinkblende, verunreinigte Zinkblende, Zinnober und mit Röntgenlicht gelbbraun verfärbtes Na Cl. Die Zeitmessung erfolgt in der Hauptsache durch Beobachtung der lichtelektrischen Ströme in elektrischen Wechselfeldern von rechteckiger Kurvenform, gelegentlich auch mit photographischer Registrierung eines Einfadenelektrometers. Fragestellungen und Ergebnisse sind in § 1 kurz zusammengefaßt.

§ 1. Fragestellung und Zusammenfassung. Diese Arbeit behandelt vier verschiedene Fragen:

1. Gudden und Pohl hatten in ihren Untersuchungen über lichtelektrische Leitung in Kristallen von Anfang an die Auffassung vertreten, daß der primäre Vorgang in einer trägheitslosen Abwanderung von Elektronen bestehe[2]). Sie nennen diesen Vorgang den negativen Primärstrom. Bei hinreichend tiefen Temperaturen haben sie in einigen Kristallen den negativen Primärstrom allein beobachten können. Ihre Messungen waren anfänglich mit einem Stoßgalvanometer, später mit einem Einfadenelektrometer ausgeführt worden. Es war gesichert, daß Einsatz und Schluß des negativen Primärstromes in weniger als 0,1 Sek. erfolgen. — Jetzt wird dieser obere Grenzwert auf 10^{-4} Sek. heruntergesetzt.

2. Weiterhin hatten Gudden und Pohl gezeigt, daß der Abwanderung der Elektronen im negativen Primärstrom das Einrücken von Ersatzelektronen folgt. Dieser als positiver Primärstrom bezeichnete Vorgang kann sowohl durch thermische Bewegung wie Bestrahlung mit langwelligem Licht bewirkt werden. In Einzelfällen läßt sich der positive Primärstrom durch hinreichend tiefe Temperaturen so niedrig halten, daß praktisch nur der negative Primärstrom allein übrigbleibt. Darauf beruhen die unter 1. genannten Untersuchungen. Im allgemeinen aber fehlt die zeitliche Trennung von negativem und positivem Primärstrom, beide überlagern sich. Diesen Fall haben Gudden und Pohl besonders ausführlich am Na Cl untersucht. Ihre Beobachtungsmethode läßt aber keine einwandfreie Trennung beider Primärstromanteile mehr zu, sobald der

[1]) Göttinger Dissertation.

[2]) ZS. f. Phys. **6**, 248, § 3, 1921.

positive Primärstrom schon wenige Sekunden nach dem trägheitslosen Einsatz des negativen Primärstromes merkliche Werte erreicht. — Hier wird der trägheitsfreie Einsatz des negativen Primärstromes auch in solchen Fällen abgetrennt, in denen der thermisch ausgelöste positive Primärstrom schon nach Bruchteilen einer Sekunde hohe Werte erreicht.

3. Neuerdings haben Gudden und Pohl wahrscheinlich gemacht, daß die gleichen Vorgänge, die den positiven Primärstrom auslösen, also thermische Bewegung und langwelliges Licht, auch Elektronen wieder beweglich machen können, die an irgendwelchen Hindernissen hängengeblieben sind[1]). — Es gelingt, weitere Beobachtungen beizubringen, die diese Auffassung stützen.

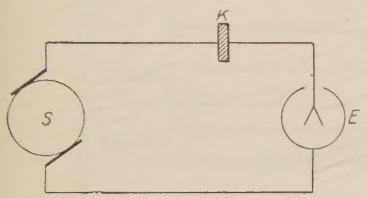


Fig. 1.

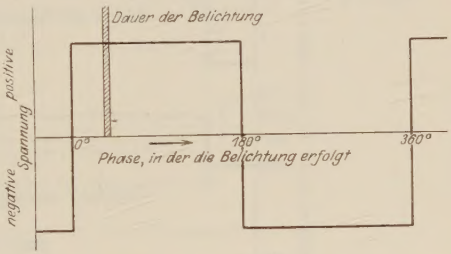


Fig. 2.

4. Endlich fehlte es bisher an Messungen, innerhalb welcher Zeit ein positiver Primärstrom einsetzt, wenn er nicht thermisch, sondern durch langwellige Bestrahlung ausgelöst wird. Gudden und Pohl haben es trotz ihrer lichtelektrischen Deutung der Ultrarotwirkung nicht gewagt, aus ihren Beobachtungen auf einen Einsatz mit sehr geringer Trägheit zu schließen[1]). — Meine Messungen zeigen, daß sich der Einsatz mindestens in weniger als 0,1 Sek. abspielt.

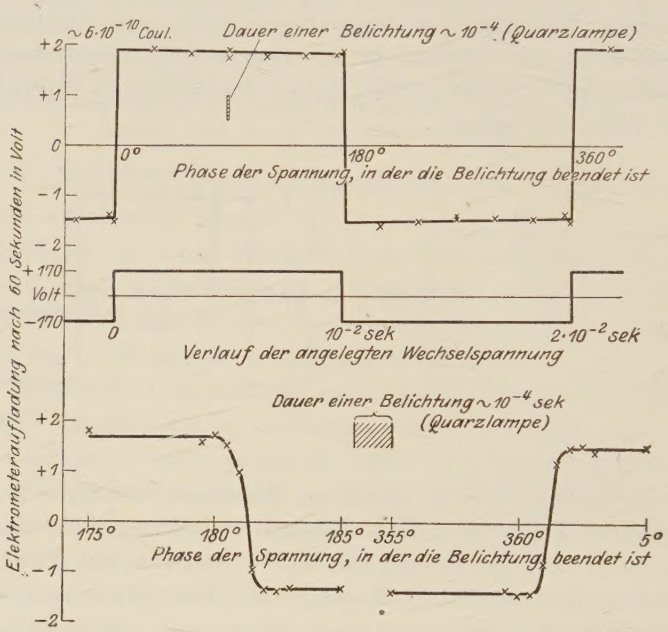
§ 2. Erste Frage: In welcher Zeit nach Schluß der Belichtung hat die Elektrizitätsbewegung im negativen Primärstrom ihr Ende erreicht? Nach § 1 liegen die Bedingungen für diese Aufgabe dann am einfachsten, wenn sich die beiden Anteile des Primärstromes zeitlich völlig voneinander trennen lassen. Bei Zimmertemperatur ist dieser Fall beim Diamanten[2]) und Steinsalz gegeben. Die thermische Auslösung des positiven Primärstromanteiles erfolgt so langsam, daß praktisch der negative Anteil allein vorhanden ist.

[1]) B. Gudden und R. Pohl, ZS. f. Phys. **31**, 651, 1925.
[2]) Dieselben, ebenda **16**, 170, § 7, 1923.

Das Untersuchungsverfahren wird durch die Fig. 1 und 2 schematisch erläutert. In Fig. 1 ist K der Kristall, E ein Einfadenelektrometer und S ein rotierendes Schaltwerk. Dieses legt erstens eine rechteckige Wechselspannung an den Kristall, wie sie in Fig. 2 angedeutet ist. Zweitens läßt es während jeder Periode in einer zuvor einstellbaren Phase kurzdauernde Belichtungen auf den Kristall treffen. Alle technischen Einzelheiten sind hinten in § 6 angeführt, hier handelt es sich nur um

Fig. 3 a.

Fig. 3 b.



Diamant. $T = 20^0$. Kristalldicke 1 mm.

das Prinzip: Fließt der negative Primärstrom J_{p-} nur während der Belichtung, ist also die Laufzeit der Elektronen gegenüber der Belichtungszeit zu vernachlässigen, so muß das Vorzeichen der Elektrometeraufladung synchron mit der Wechselspannung wechseln, wenn man die Phase, in der die Belichtung erfolgt, über eine ganze Periode variiert.

Fig. 3a gibt ein Beispiel für Diamant. Die Aufladung des Elektrometers gleicht der reckteckigen Kurvenform der Wechselspannung[1]). Der wichtigste Teil der Kurve ist die Umgebung der beiden Feldwechsel.

[1]) Auf die schwache Neigung der horizontalen Stücke kommen wir in Anm. 1 auf S. 378 zurück.

Diese Stücke sind in der Fig. 3b noch einmal in vergrößertem Maßstabe dargestellt.

Fig. 4a und b geben in entsprechender Weise die Messungen an NaCl bei etwa 30 Grad.

Man entnimmt den Fig. 3 und 4, daß der Übergang von einem Höchstwert der Elektrometeraufladung zu dem des entgegengesetzten Vorzeichens genau die Zeit erfordert, während der die Belichtung des Kri-

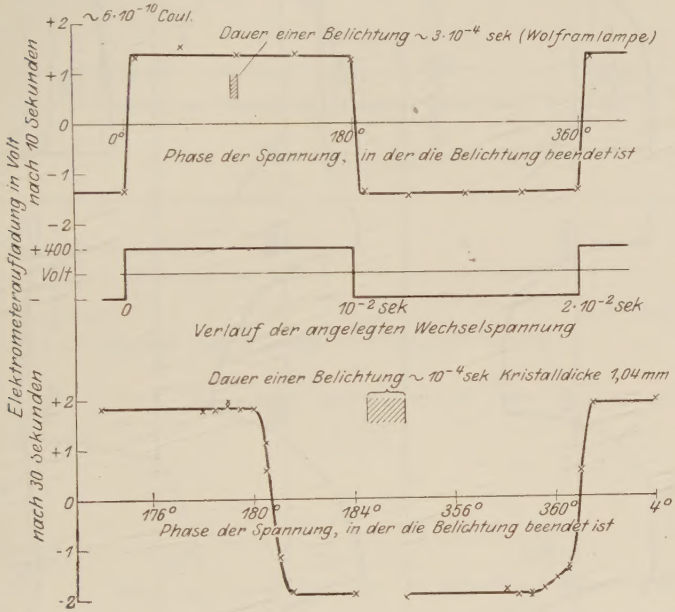


Fig. 4 a.

Fig. 4 b.

Steinsalz, mit Röntgenlicht verfärbt. $T = 30^0$. Kristalldicke 3,08 mm.

stalles erfolgt. Damit ist nach dem Maßstabe der Zeitachse erwiesen, daß zwischen Schluß der Belichtung und Ende des negativen Primärstromes keine Zeiten größer als 10^{-4} Sek. verstreichen.

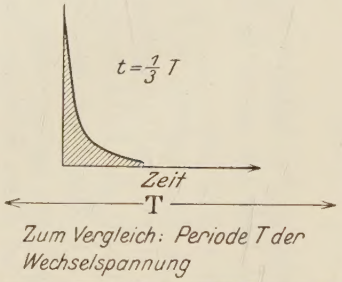
§ 3. Zweite Frage: Abtrennung des negativen Primärstromes von dem übergelagerten positiven. Die Überlagerung beider Primärstromanteile haben Gudden und Pohl beim NaCl bis in Einzelheiten verfolgt. In anderen Kristallen, z. B. Zinkblende und Zinnober, haben sie die Überlagerung nur in großen Zügen nachgewiesen. Das in § 2 benutzte Meßverfahren läßt nun auch bei diesen Kristallen den negativen Primärstrom abtrennen. Um das zu zeigen, erörtern wir zunächst, wie die Elektrometeraufladung in diesem Falle von der Periodendauer

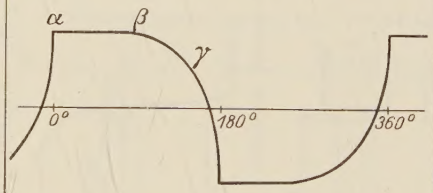
Abklingungskurve des thermisch ausgelösten positiven Primärstromes.

Aufladungskurve vom positiven Primärstrom allein.

Aufladungskurve bei Überlagerung von negativem (– – – – –) und positivem Primärstrom.

Fig. 5 a.





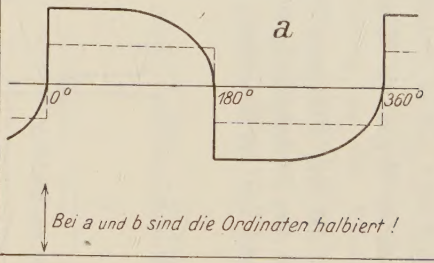
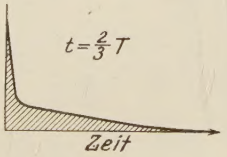
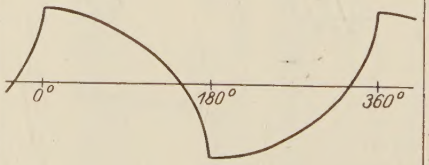


Fig. 5 b.





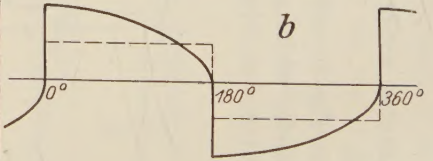
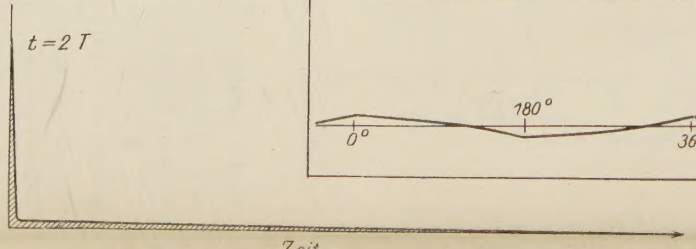
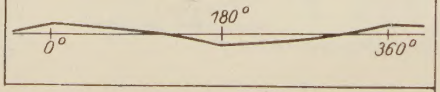
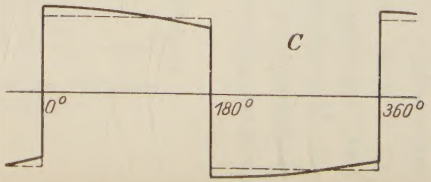


Fig. 5 c.







der rechteckigen Wechselspannung und der Phase, in der die Belichtung erfolgt, abhängen wird. Wir brauchen dazu irgend eine Annahme über den zeitlichen Verlauf des positiven Anteils. Im Anschluß an frühere Messungen von Gudden und Pohl wählen wir den in Fig. 5 erste Spalte angedeuteten Verlauf, den man durch eine Summe von Exponentialfunk-

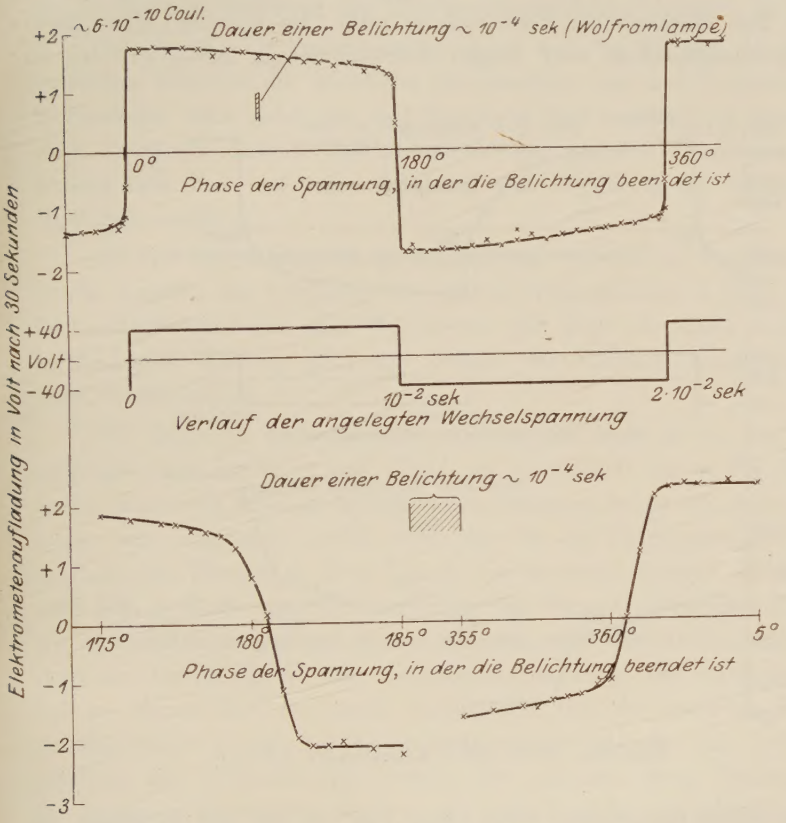


Fig. 6 a.

Fig. 6 b.

Klares ZnS. $T = 20^0$. Kristalldicke 1,07 mm.

tionen annähern könnte. Es kommt nun darauf an, wie sich diese Abklingungszeit zur Periodendauer der rechteckigen Wechselspannung verhält.

Ist sie klein gegenüber der Halbperiode, so wird sich bei Belichtung in jeder Phase der Wechselspannung der volle positive Anteil dem negativen hinzufügen, vgl. Fig. 5a (α β in der zweiten Spalte). Erst wenn sich die Belichtung einem Feldwechsel nähert, wird der positive Primärstrom zu einem beträchtlichen Teile erst im umgekehrten Felde fließen

und die resultierende Elektrometeraufladung verkleinert werden (z. B. bei γ). Wird die Abklingungszeit etwa mit der Halbperiode vergleichbar (Fig. 5 b), so hat die Elektrometeraufladung den gleichen Wert wie vorher, wenn die Belichtung in den Anfang der Spannungsphasen fällt. Sie wird um so kleiner, je mehr sich die Belichtung zeitlich der Feldumkehr nähert. Entsprechend stellt die Fig. 5 c den Fall dar, in dem die Abklingungszeit gleich dem 2fachen einer Periodendauer ist[1]). Im Grenzfall einer gegen die Spannungsperiode sehr langen Abklingungszeit haben wir den zu

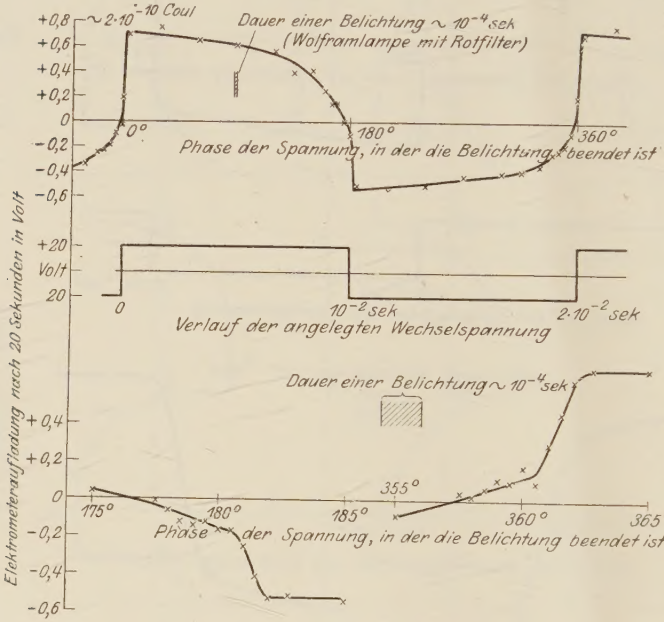


Fig. 7 a.

Fig. 7 b.

Zinnober. $T = 20^0$. Kristalldicke 0,33 mm.

Beginn dieses Paragraphen behandelten Fall, in dem wir praktisch den negativen Primärstrom allein beobachten.

An diesen Fig. 5 a bis c ist uns zunächst nur wesentlich, daß die trägheitslose Elektronenbewegung sich auch hier wie oben durch eine sprunghafte Änderung der Elektrometeraufladung bemerkbar macht, wenn die Be-

[1]) So erklärt sich höchstwahrscheinlich die schwache Neigung der fast horizontal verlaufenden Kurvenstücke in Fig. 3 a: auch beim Diamanten fließt ein, wenngleich kleiner Bruchteil des positiven Primärstromes in unmittelbarem Anschluß an die Belichtung, während der überwiegende Hauptteil erst im Laufe vieler Minuten, ja Stunden folgt.

lichtung einmal unmittelbar vor, das nächste Mal unmittelbar nach dem Feldwechsel vor sich geht. Im übrigen braucht die Kurve der Elektrometeraufladung der der Wechselspannung keineswegs mehr ähnlich zu sein.

Derartige Messungen gibt die Fig. 6 für klares ZnS und Fig. 7[1]) für einen nicht ganz einwandfreien HgS-Kristall. In beiden Fällen ist die sprunghafte Änderung der Elektrometeraufladung deutlich zu sehen.

Fig. 6b und 7b bringen entsprechend den Fig. 3b und 4b in vergrößertem Maßstab die wichtigen Kurvenstücke aus der Umgebung der Feldumkehr. Man sieht, daß auch hier beim ZnS und HgS, in denen sich beide Primärstromanteile überlagern, sich der negative Primärstrom abtrennen läßt, und daß seine Zeitdauer sich wiederum zu weniger als 10^{-4} Sek. ergibt.

Mit der Abtrennung des „trägheitsfreien" negativen Primärstromes ist die Aufgabe der Zerlegung des ganzen Primärstromes in seine beiden Bestandteile aber erst zum Teil gelöst: Es fehlt vor allem noch eine Untersuchung über den zeitlichen Verlauf des thermisch bedingten positiven Primärstromes.

Wir haben für diesen zeitlichen Verlauf in Analogie zu den Beobachtungen von Gudden und Pohl am Steinsalz[2]) die in Fig. 5 erste Spalte skizzierten Abklingungskurven angenommen: einen erst sehr steilen, später sehr langsamen Abfall, etwa wie für die Helligkeitskurve eines abklingenden Phosphors. Man könnte, um ein rohes Beispiel zu nehmen, etwa Fig. 6 (ZnS) mit einem zwischen Fig. 5b und c liegenden Kurventyp in Parallele setzen und daraus schließen, daß die Abklingungskurve zwischen den in Fig. 5b und c angenommenen liegt. Das würde besagen, daß im klaren ZnS der rasch abklingende Teil des positiven Primärstromes bereits in etwa 1,5 Wechselspannungsperiode oder in $3 \cdot 10^{-2}$ Sek. geflossen ist. Grundsätzlich besteht die Aussicht, durch Beobachtung der Elektrometeraufladungskurven bei Variation der Periodendauer der rechteckigen Wechselspannung die Abklingungskurve des positiven Primärstromes punktweise zu ermitteln. Statt dieser aus verschiedenen Gründen sehr umfangreichen Untersuchung haben wir uns damit begnügt, zu zeigen, daß außer dem rasch abklingenden Teil des positiven Primärstromes auch hier wie in Fig. 5 ein langsam abklingender Rest vorhanden ist, der sich noch einige Sekunden lang verfolgen läßt.

---

[1]) Es bleibt zunächst außer Acht, daß die Abszissen im Gegensatz zu Fig. 5 nicht genau bei 180 bzw. 360 Grad geschnitten werden.

[2]) ZS. f. Phys. **31**, 651, 1925.

Diesem Zweck diente eine zweite Versuchsanordnung. Ihr wesentlicher Teil war ein Einfadenelektrometer mit photographischer Registrierung der Aufladung. Die technischen Einzelheiten findet man wiederum in § 6. Bei der Kleinheit der verfügbaren Kristalle und der dadurch bedingten Elektrometerempfindlichkeit ließ sich die Einstelldauer des Fadens nicht unter 0,1 Sek. heruntersetzen. Fig. 8a zeigt das Photogramm der Fadenbewegung, wenn das Elektrometer durch plötzlichen Kontakt mit einer Batterie aufgeladen wird. Fig. 8b zeigt das entsprechende Bild für eine Aufladung durch eine *K*-Zelle nach Elster und Geitel, auf die ein Lichtblitz von $^1/_{32}$ Sek. gefallen war. Dann folgt

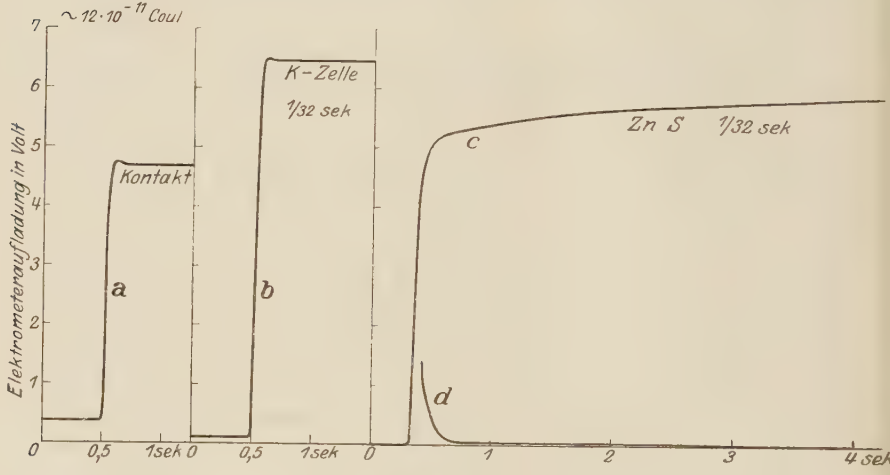


Fig. 8.

in Fig. 8c das Photogramm für einen klaren ZnS-Kristall, ebenfalls bei $^1/_{32}$ Sek. Belichtung. Man sieht, daß etwa $^3/_4$ der gesamten hier im Primärstrom beobachteten Elektrizitätsmenge innerhalb der Einstelldauer des Elektrometers, also innerhalb 0,1 Sek. geflossen sind. $^1/_4$ folgt in den nächsten Sekunden. Nach der ersten Zehntelsekunde darf man die Kurve graphisch differenzieren, um den zeitlichen Verlauf des Stromes, Kurve 8d, zu erhalten.

Nach dem Verlauf der Aufladekurve 8c kann es nicht zweifelhaft sein, daß der positive Primärstrom auch nach Schluß der Beobachtung, wenn auch schwach, so doch lange Zeit weiterfließt. Anderenfalls wäre es ja auch nicht verständlich, warum Gudden und Pohl[1]) bei Zink-

[1]) ZS. f. Phys. **16**, 170, § 5. 1923.

sulphidkristallen noch 20 Sek. nach der Belichtung einen Rest des positiven Primärstromes mit ultrarotem Licht auslösen konnten. All das ist mit der Auffassung in bester Übereinstimmung, daß die thermische Abklingungskurve des positiven Primärstromes mit wachsenden Zeiten immer langsamer abfällt.

§ 4. Dritte Frage: Gibt es eine thermische Auslösung lichtelektrisch abgespaltener, dann aber hängengebliebener Elektronen? Wir hatten in der zum HgS gehörenden Fig. 7 einen Punkt zunächst als unerheblich zurückgestellt: Die Aufladungskurve des Elektrometers schneidet die Abszisse nicht im Augenblick des Feldwechsels, sondern, wenn auch nur wenig, so doch deutlich vor demselben. Die Schnittpunkte liegen etwa bei den Phasen 175 und 355 Grad. Diese unscheinbare Beobachtung ist ein sicherer Anhalt dafür, daß in dem hier benutzten, wie erwähnt, nicht einwandfreien Zinnoberkristall in dem thermisch ausgelösten Strome außer positivem Primärstrom[1]) auch eine Bewegung zuvor hängengebliebener Elektronen enthalten sein muß.

Um das zu zeigen, wiederholen wir zunächst die am Anfang von § 3 angestellten Erörterungen. Wir diskutieren die Abhängigkeit der Elektrometeraufladungen von der Phase der rechteckigen Wechselspannung, in der die Belichtung erfolgt; jedoch gegenüber § 3 mit einer entscheidenden Abänderung: Der thermisch ausgelöste Strom soll diesmal nicht nur aus positivem Primärstrom bestehen, sondern „bipolar" sein[2]). Im übrigen soll die Abklingungskurve des thermischen Stromes die gleiche sein wie in § 3. Wiederum untersuchen wir in einer Folge von Figuren (9a bis c), wie die Aufladungskurven sich ändern, wenn das Verhältnis zwischen Abklingungszeit und Wechselspannungsperiode verschiedene Werte annimmt.

In Fig. 9a soll der Hauptteil des thermischen Stromes in $^2/_3$ der Wechselspannungsperiode abklingen. Der trägheitslose negative Primärstrom allein liefert die in der rechten Spalte punktierte Aufladekurve. Der thermisch ausgelöste „bipolare" Strom allein liefert die Kurve in der zweiten Spalte. Beide zusammengenommen geben die Kurve in der dritten Spalte. Analog sind die Kurven 9b und c entstanden.

Man sieht, daß man bei Anwesenheit eines „bipolaren" thermischen Stromes durch hinreichend lange Perioden der Meßwechselspannung einen

---

[1]) Also Verlagerung positiver Restladungen zur jeweiligen Kathode.

[2]) Die von ihm herrührende Elektrizitätsmenge soll also größer sein als die vom trägheitslosen negativen Primärstrom. Vgl. Gudden und Pohl, ZS. f. Phys. **31**, 651, § 5, 1925.

Schnitt der Aufladungskurven mit der Abszisse außerhalb der Phasen 180 und 360 Grad erreichen kann. Umgekehrt zeigen die an Hand der Fig. 5 angestellten Überlegungen, daß bei nur positivem thermischen Strom die Abszisse stets bei 180 und 360 Grad geschnitten werden muß.

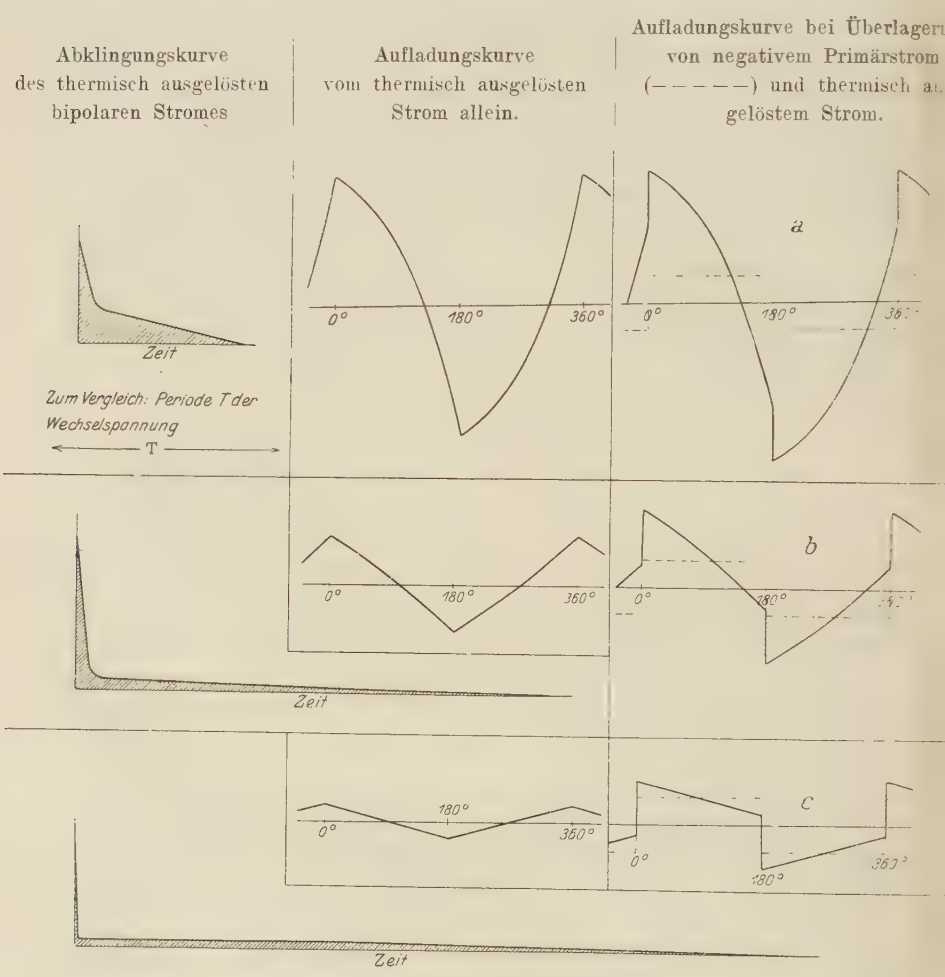


Fig. 9. Es ist angenommen, daß der thermisch ausgelöste Strom eine fünfmal größere Elektrizitätsmenge transportiert, als im negativen Primärstrom trägheitslos fließt.

Findet man also in Fig. 7a den Schnitt bei 175 und 355 Grad, so beweist das, daß der thermische Strom bipolar sein muß. Und zwar zeigt ein Vergleich der Fig. 7a mit Fig. 9, daß der thermische Strom noch rascher abklingen muß als in der Fig. 9a, also rascher als

in einer halben Wechselspannungsperiode oder etwa 10^{-2} Sek. Das ist natürlich nur eine erste Näherung. Die Fig. 9 stellt ja nur ein mit willkürlichen Konstanten durchgeführtes Zahlenbeispiel dar. Wesentlich ist nur der qualitative von den numerischen Annahmen weitgehend unabhängige Schluß, daß neben positivem Primärstrom auch Elektronen in Richtung des negativen Primärstromes thermisch weitergeleitet werden.

Dieser zunächst nur auf die Messungen der Fig. 7 gestützte Schluß hat sich an verunreinigter grüner Zinkblende in weitem Umfange bestätigen lassen. Dieses Material wurde auf Grund alter Überlegungen von Gudden und Pohl gewählt. ZnS gehört zu den lichtelektrischen Leitern mit hohem optischen Brechungsindex. Die grünliche Farbe rührt von gitterfremden Beimengungen her. Gudden und Pohl haben nun mehrfach die Auffassung vertreten, daß die Beimengungen oberhalb einer gewissen Konzentration den ungestörten Ablauf des negativen Primärstromes verhindern, indem sie die lichtelektrisch abgespaltenen Elektronen vor Erreichen der Anode abfangen. Die Fig. 10a bis d zeigen uns die Aufladekurven, die am grünlichen ZnS bei verschiedenen Periodendauern der Wechselspannung beobachtet worden sind. Alle Kurven zeigen im wesentlichen die in Fig. 9 dargestellten Typen. Die Aufladung des Elektrometers wechselt bei den Kurven a bis c das Vorzeichen zwischen 120 und 135 Grad bzw. zwischen 290 und 300 Grad. Erst bei der kürzesten Periode (Kurve d) verschiebt sich die Phase des Vorzeichenwechsels bis 180 bzw. 360 Grad, wie es nach Fig. 9c zu erwarten war.

Außerdem ist in allen Fällen genau synchron mit dem Feldwechsel der für den trägheitslosen negativen Primärstrom charakteristische Sprung der Aufladung klar zu sehen, zweifellos eine erfreuliche Stütze der an Hand der Fig. 9 entwickelten Vorstellung.

Wir fassen den Inhalt dieses Paragraphen folgendermaßen zusammen. Die Wechselstrommethode wird auf verunreinigte Kristalle von ZnS und HgS angewandt. In beiden Fällen ist der primäre Vorgang, der trägheitslose negative Primärstrom, durch einen Sprung beim Feldwechsel markiert und damit auch für verunreinigte Kristalle sicher nachgewiesen. Außerdem wird gezeigt, daß der thermisch ausgelöste Strom in diesen verunreinigten Kristallen auch negative Träger enthält. Dadurch gewinnt die Auffassung von Gudden und Pohl[1]), daß Beimengungen in Kristallen den Primärstrom durch Abfangen von Elektronen stören können, eine weitere Stütze.

---

[1]) ZS. f. Phys. **16**, 170, § 8, 1923; **31**, 651, §§ 5 u. 6, 1925.

§ 5. Vierte Frage: In welcher Zeit setzt ein durch langwelliges Licht ausgelöster positiver Primärstrom ein? Zur Beantwortung dieser Frage empfiehlt sich einer der Kristalle, in denen

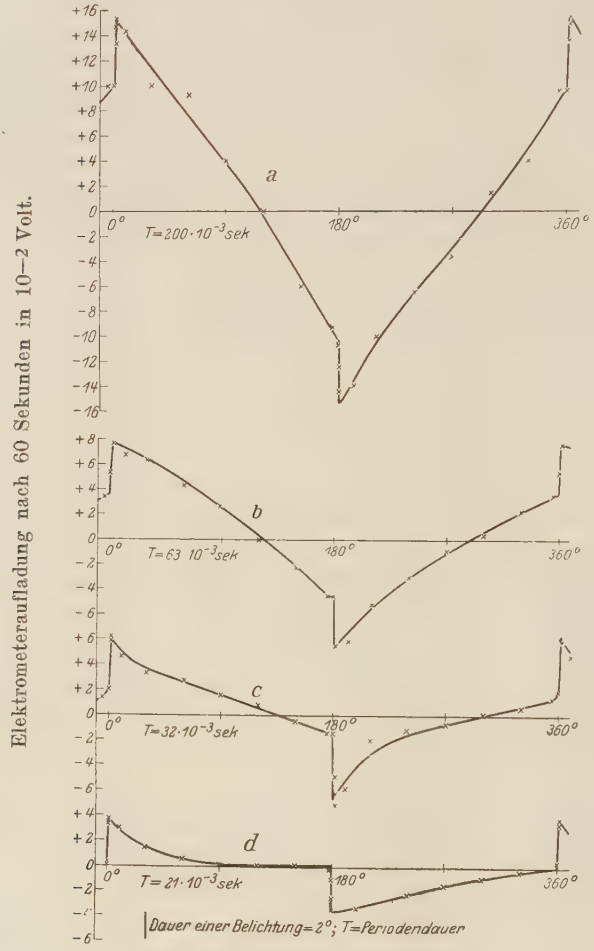


Fig. 10. Grünliches Zinksulfid. Spannung 40 Volt. Kristalldicke 2 mm.

man den negativen und den positiven Primärstrom zeitlich praktisch ganz voneinander getrennt beobachten kann, weil die thermische Bewegung nicht ausreicht, den positiven Primärstrom zu merklichen Beträgen anwachsen zu lassen. Man belichtet den Kristall mit kurzwelligem, gut in ihm absorbiertem Licht, und synchron mit dieser Belichtung fließt trägheitslos der negative Primärstrom. Dann kann man viele Minuten lang

warten, bis man langwelliges Licht auf den Kristall wirft und damit den positiven Primärstrom auslöst. Nach Gudden und Pohl ist NaCl ein für diesen Zweck sehr geeignetes Material. Gudden und Pohl hatten ihre Versuche in der Art ausgeführt, daß sie die Elektrometeraufladung mit einem Papierstreifen-Chronographen verfolgten. Ich habe nun statt dessen die Aufladung des Elektrometers photographisch registriert, um auch für kürzere Zeiten sichere Aussagen machen zu können. Die Apparatur war die schon in § 3 benutzte, deren Einzelheiten in § 6 beschrieben werden.

Fig. 11 a gibt zunächst das Photogramm für den negativen Primärstrom bei $^1/_{32}$ Sek. Belichtung mit blauem Licht. Der Elektrometerfaden erreicht innerhalb seiner Einstelldauer, also innerhalb 0,1 Sek., seinen vollen Ausschlag.

Fig. 11 b bezieht sich auf den positiven Primärstrom. [Der Kristall war eine Zeitlang blau belichtet worden, und dann wird etliche Minuten nach Schluß dieser Belichtung das intensive Ultrarot einer Bogenlampe (Hartgummifilter) $^1/_{32}$ Sek. auf den Kristall geworfen. Auch hier erreicht der Faden in 0,1 Sek. seinen Höchstwert.

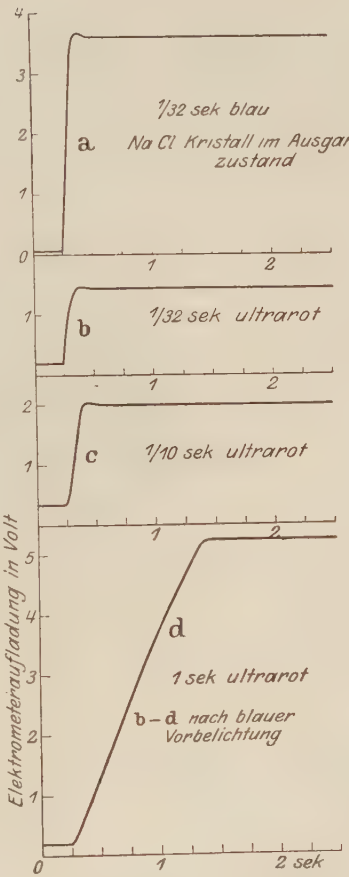


Fig. 11. 240 Volt.
Kristalldicke 1,29 mm.

In Fig. 11 c hat in einem analogen Versuch das Ultrarot 0,1 Sek. lang auf den Kristall eingewirkt, in Fig. 11 d sogar eine ganze Sekunde. — Diese vier Fig. 11 a bis d zeigen mit Sicherheit, daß der durch Ultrarot ausgelöste positive Primärstrom beim Beginn und nach Schluß der Ultrarotbelichtung keine Trägheit zeigt, die mit 0,1 Sek., der Einstelldauer des Elektrometerfadens, vergleichbar wäre. 0,1 Sek. ist ein oberer Grenzwert für die gesuchte Zeit. Leider reichte die In-

tensität des verfügbaren ultraroten Lichtes nicht aus, um durch Anwendung der Wechselspannungsmethode diesen Grenzwert noch weiter herunterzusetzen, es wird gar zu wenig vom Ultrarot im Kristall absorbiert.

Durch andere hier im Institut ausgeführte Arbeiten ist inzwischen höchst wahrscheinlich gemacht, daß es sich bei der Auslösung des positiven Primärstromes durch ultrarotes Licht ebenfalls um lichtelektrische $h\nu$-Prozesse handelt[1]); d. h. die einzelne Ladungsverschiebung erfolgt auch im positiven Primärstromanteil trägheitslos, und das zeitliche von Gudden und Pohl verfolgte Abklingen des positiven Primärstromes bei

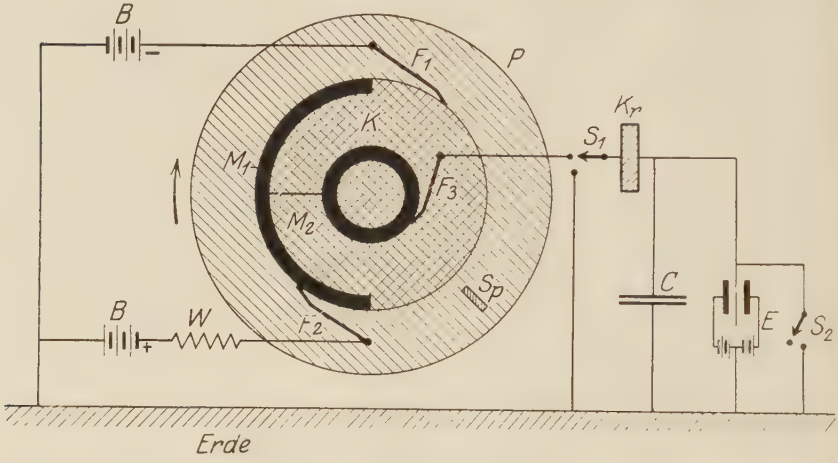


Fig. 12.

konstanter Ultraroteinstrahlung rührt daher, daß mit fortschreitender Erschöpfung des Bestandes absorptionsfähiger Ladungen die Absorptionswahrscheinlichkeit für das langwellige Licht ständig abnimmt.

Mit dieser lichtelektrischen Auffassung der Ultrarotwirkung ist obiger Grenzwert für die Trägheitsfreiheit des langwellig ausgelösten positiven Primärstromes in bestem Einklang.

§ 6. Technische Einzelheiten der benutzten Meßverfahren. A. Die Anwendung der Wechselspannung von rechteckiger Kurvenform. Ein ausführlicheres Schema der Anordnung zeigt Fig. 12. *Kr* ist der zu untersuchende Kristall. Eine seiner Elektroden ist mit der Schleiffeder F_3 verbunden oder kann durch den Schalter S_1 geerdet

[1]) B. Gudden und R. Pohl, ZS. f. Phys. **30**, 14, § 4, 1924; Z. Gyulai, ebenda, **32**, 1925.

werden. K ist eine rotierende Hartgummischeibe von etwa 15 cm Durchmesser. In die Hälfte ihres Umfanges ist ein Messingstreifen M_1 eingelassen: dieser hat mit dem seitlich angebrachten Messingring M_2, auf dem F_3 schleift, leitende Verbindung. Je nach der Stellung von K erhält F_3 über M_2, M_1 und die Schleiffeder F_1 oder F_2 von den Batterien B positives oder negatives Potential gegenüber Erde. Die Batterien B besitzen nahezu gleiche EMK; bei größeren Ansprüchen hinsichtlich Gleichheit der Spannungen wurden sie durch eine Batterie mit einem Präzisionswiderstand von insgesamt 10^6 Ohm in Spannungsteilerschaltung ersetzt. Der Widerstand W dient zur Verhütung eines Kurzschlusses in der Stellung von K, in der F_1 und F_2 gleichzeitig M_1 berühren; er betrug 10^5 bis $2 \cdot 10^6$ Ohm. Ein merklicher Abfall der Spannung längs der Leitungen von der Spannungsquelle zum Kristall fand selbst bei den größten vorkommenden lichtelektrischen Strömen und $W = 2 \cdot 10^6$ Ohm nicht statt.

Die andere Kristallelektrode führt zu einem Kondensator C, der die während einer Messung durch den Kristall geflossene Elektrizitätsmenge aufnimmt. Die Aufladung wird mit dem Einfadenelektrometer E gemessen. Alle Teile, die an dieser Seite des Kristalls liegen, sind mit Bernstein isoliert; die verwendeten Kristalle verhalten sich im Dunkeln wie Isolatoren.

Auf derselben Achse wie K sitzt eine gegen K um meßbare Winkel verstellbare Pappscheibe P (Durchmesser 26 cm) mit dem Spalt Sp von veränderlicher Breite. Durch diesen Spalt erfolgt die kurze Belichtung in bestimmter Phase der durch den rotierenden Kommutator erzeugten Wechselspannung. Zu diesem Zweck wird die Lichtquelle zunächst auf einen festen Spalt und dieser achromatisch auf die rotierende Pappscheibe abgebildet, so daß Sp bei jeder Umdrehung das Licht einmal freigibt. Das Bild des festen Spaltes wird weiter achromatisch auf den Kristall abgebildet.

Der Antrieb des Schaltwerkes erfolgte durch einen Schnurtrieb mit Elektromotor. Die höchste zur Anwendung gelangte Umlaufszahl war 2860 Umdrehungen in der Minute.

Die meisten Messungen wurden folgendermaßen ausgeführt:

1. Erdung des Kristalls durch S_1 und S_2 und $^1/_2$ bis 3 Minuten dauernde intensive Belichtung zur Beseitigung aller Polarisationsspannungen.

2. Einstellung des Schaltwerkes und Anlaufenlassen auf die festgesetzte Umlaufszahl. Das durch Sp fallende Licht wird abgeblendet.

3. Enterdung von C durch S_2 (da S_1 noch an Erde bleibt, befindet sich auf C keine Influenzladung).

4. Durch S_1 wird Spannung angelegt.

5. Das durch Sp fallende intermittierende Licht wird bestimmte Zeit freigegeben.

6. S_1 wird an Erde gelegt.

7. Ablesung der Aufladung.

In einigen Meßreihen konnte die Änderung der Aufladung während der Freigabe des intermittierenden Lichtes beobachtet werden. Dies geschah stets bei den Messungen, bei denen das Einfadenelektrometer (1 Skalenteil $= {}^1/_{20}$ Volt) durch ein empfindlicheres Instrument, das viel trägere Quadrantelektrometer (1 Skalenteil $= {}^1/_{1000}$ Volt), ersetzt werden mußte. In den meisten Fällen dagegen war das Elektrometer während

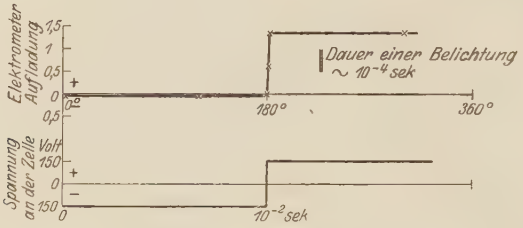


Fig. 13.

der Messung nicht mit der Apparatur verbunden (Fig. 12 anders); es blieb geerdet und wurde erst zur Ablesung der Aufladung zugeschaltet. Dies war notwendig wegen starker Influenzladungen durch die Wechselspannung, die zu einer Beschädigung des auf die benutzten Frequenzen noch leicht ansprechenden Instrumentes führen konnten.

Die Kapazität C betrug etwa 300 cm, nur bei den Messungen mit dem Quadrantelektrometer bestand C lediglich aus der Kapazität des Instrumentes und der statisch geschützten Zuleitungen.

Zu bemerken ist noch, daß erstens C groß genug gegenüber der von dem Kristall mit Elektroden gebildeten Kapazität war, so daß praktisch die ganze Wechselspannung zwischen den Kristallelektroden lag, zweitens die Aufladungen so klein gehalten wurden, daß sie gegenüber den angelegten Spannungen nicht ins Gewicht fielen.

Zur Ermittlung der Phase der Wechselspannung, in der die Belichtung beendet war, wurde eine Nullstellung markiert. Hierfür wurde die Kommutatorscheibe K in dem für alle Messungen festgelegten Sinne

so weit gedreht, bis die vordere Kante des Streifens M_1 gerade die nur mit dem äußerten Ende aufliegende Feder F_1 leitend berührte. Die Spaltscheibe P wurde dann so gestellt, daß die Belichtung vorher erfolgte und an genau dieser Stelle beendet war. Der Fehler durch Verschiebung der Stelle des Feldwechsels und ungenaue Einstellung von P war kleiner als 1 Grad (bei 2860 Umdrehungen in der Minute etwa $\frac{1}{2} \cdot 10^{-4}$ Sek.).

Als Beispiel für die Brauchbarkeit der Wechselspannungsmethode geben wir in Fig. 13 eine Messung an der sicher trägheitslosen K-Zelle nach Elster und Geitel wieder.

B. Die Methode der photographischen Registrierung. Der optische Teil zur Belichtung des Kristalls ist der gleiche wie bei A., nur steht an Stelle von P im Strahlengang ein Schlitzverschluß ($^1/_{10}$ bis $^1/_{32}$ Sek.), auf dessen Jalousie das Bild des festen Spaltes fällt. Streulicht ist durch einen zweiten, vor dem Momentverschluß stehenden Spalt abgeblendet.

Der Schlitz ist dem Spaltbilde parallel, so daß die Belichtung momentan einsetzt und endet.

Der elektrische Teil besteht nur aus der Spannungsquelle, dem Kristall mit Elektroden und dem Einfadenelektrometer. Ein Pol der Batterie liegt an Erde, der andere an einer Kristallseite, die andere Kristallseite am Elektrometer. Die Empfindlichkeit betrug 1 Skalenteil $= {}^1/_{10}$ Volt, entsprechend etwa $2 \cdot 10^{-12}$ Coulomb.

Skale und Faden des Elektrometers werden mit einer 5 Amperebogenlampe, auf 17 cm Gesichtsfelddurchmesser vergrößert, auf einen 14,5 cm langen schmalen Spalt projiziert, hinter dem sich die photographische Platte langsam vorbeibewegt. Die Gleitvorrichtung für die Kassette (Plattengröße 13 . 18 cm) und der Spalt (Breite verstellbar, größte Breite etwa 1 mm) sind zu einem Metallrahmen vereinigt, der gleichzeitig nach Öffnung der Kassette die Platte vor Fremdbelichtung schützt.

Die gleichmäßige Bewegung der Platte erfolgt von unten nach oben durch Zug mittels einer dünnen Kupferlitze. Diese ist mit einem Ende an der Kassette befestigt und einmal um eine von einem Elekromotor langsam bewegte Trommel geschlungen; am anderen Ende befindet sich ein freihängendes Gegengewicht. Zur Zeitregistrierung diente eine Stimmgabel ($n = 128$) oder das Uhrwerk eines Weckers mit verkleinerter Unruhe (Schwingungsdauer $^1/_{10}$ Sek.).

Da für die Messung des Stromverlaufs ganz kurze Zeit nach Schluß der Belichtung die Wechselspannungsmethode zur Verfügung stand, wurde auf die recht mühsame Korrektion der erhaltenen Photogramme bezüglich Trägheit des Fadens und Dämpfung [1]) verzichtet.

Für die Anregung dieser Arbeit und die mir bei der Ausführung erteilten nützlichen Ratschläge sage ich Herrn Prof. Dr. R. Pohl und Herrn Prof. Dr. B. Gudden meinen herzlichen Dank.

Göttingen, I. Physikalisches Institut der Universität, Mai 1925.

---

[1]) W. Einthoven, Ann. d. Phys. **21**, 483, 665, 1906.

Lebenslauf.

Ich, Friedrich Oskar Werner Flechsig, preußischer Staatsangehörigkeit, evangelischer Konfession, wurde am 8. Juni 1900 zu Köln a. Rh. als Sohn des Kaufmanns Alexander Flechsig geboren.

Von Ostern 1906 bis Herbst 1908 besuchte ich die Volksschule in Hannover, dann bis 1911 das städt. Gymnasium zu Düsseldorf. Die weitere Schulausbildung erhielt ich auf dem Gymnasium Andreanum in Hildesheim, das ich mit dem Notabiturium 1917 verließ, um bis Ostern 1918 im Hilfsdienst tätig zu sein.

Darauf ließ ich mich an der Technischen Hochschule in Hannover, dem Wohnsitz meiner Eltern, zum Zweck des Studiums der Mathematik, Physik und Chemie immatrikulieren.

Im Laufe des ersten Semesters wurde ich zum Heeresdienst eingezogen, aus dem ich infolge langer Lazarettbehandlung wegen eines schweren Unfalles erst am 10. Oktober 1919 entlassen wurde. Ich setzte dann mein Studium in Hannover fort.

Ostern 1920 ging ich nach Göttingen. Hier bestand ich im Januar 1924 die wissenschaftliche Prüfung für das höhere Lehramt.

In Hannover hörte ich hauptsächlich Vorlesungen der Herren Professoren Eschweiler, Kiepert, C. H. Müller, Oertel, Salkowski, Seubert.

In Göttingen verdanke ich meine Ausbildung besonders den Herren Professoren Born, Franck, Gudden, Landau, G. E. Müller, Pohl, Reich, Runge.